PHYSIK UND TECHNISCHE ENTWICKLUNG EINES STROMSTARKEN VAN DE GRAAFF-GENERATORS OFFENER BAUWEISE UNTER VERWENDUNG EINES 1,6 KM LANGEN, ENDLOSEN, MIT HOHER GESCHWINDIGKEIT UMLAUFENDEN POLYAMIDFADENS NACH BAILITIS

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

dem Fachbereich Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von
Hartmut Hiller
aus
Zgierz

1978

8 538

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41523702_0080

PHYSIK UND TECHNISCHE ENTWICKLUNG EINES STROMSTARKEN VAN DE GRAAFF-GENERATORS OFFENER BAUWEISE UNTER VERWENDUNG EINES 1,6 KM LANGEN, ENDLOSEN, MIT HOHER GESCHWINDIGKEIT UMLAUFENDEN POLYAMIDFADENS NACH BAILITIS

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

dem Fachbereich Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von
Hartmut Hiller
aus
Zgierz

1978

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Tag der mündlichen Prüfung:	15. Dez. 1978
Dekan:	Prof. Dr. H. Mauder
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. G. Möllenstedt
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. R. Schief

Fotodruck H. Resch · Georgstraße 50 · 7402 Kirchentellinsfurt

Inhalt

		Seite
1.	Einleitung	1
2.	Der mechanische Aufbau	2
2.1	Spannvorrichtung und Antrieb	4
2.2	Der Potentialteiler	4
2.3	Die Teilerwiderstände	7
2.4	Die Hochspannungselektrode	8
2.5	Schwingungsdämpfende Massnahmen	8
3.	Die Verwendung von Polyamiddraht anstelle eines Bandes	10
3.1	Vorversuche	10
3.2	Die Anordnung und Führung des Polyamiddrahtes	11
3.3	Die konstante Zugspannung des Polyamiddrahtes	13
3.4	Das Einziehen und Auswechseln des Fadenbandes	13
3.5	Das Klebeverfahren	14
4.	Der Ladungstransport auf der Polyamiddrahtoberfläche	15
4.1	Die Flächengeschwindigkeit des Fadenbandes	17
4.2	Die Be- und Entladung des Polyamiddrahtes	19
4.3	Der Kurzschlusstrom	20
4.4	Die maximale Flächenladungsdichte und Transportfeldstärke	23
5.	Die Erzeugung hoher Gleichspannungen mit dem Fadengenerator	24
5.1	Die Messung der Hochspannung	27
5.2	Der Fadengenerator in der 30-stufigen Ausführung	28
5.3	Der 42-stufige 1 MV Fadengenerator	32
5.4	Die Stabilität der erzeugten Hochspannung	35
6.	Zusammenfassung	41
7.	Danksagung	42
8.	Literatur- und Firmenverzeichnis	43

1. Einleitung

Zur Erzeugung hoher Gleichspannungen im Megavolt-Bereich werden am häufigsten elektrostatische Generatoren verwendet [1] . Robert J. Van de Graaff [2, 3] baute 1931 in Princeton den ersten funktionsfähigen Bandgenerator. Hohlkugeln aus Kupfer von 61 cm Durchmesser dienten als Hochspannungselektroden, die isoliert aufgestellt waren. Ein endloses Seidenband von 5, 6 cm Breite transportierte die Ladung kontinuierlich auf die Elektroden. Die Weiterentwicklung des Van de Graaff-Generators diente der Erhöhung von Hochspannung, Stromstärke und Stabilität.

Spannungssteigerungen bis zu einigen MV sind in Luft als isolierendem Medium bei offener Bauweise stets mit überproportionalen Vergrößerungen des benötigten Raumes verbunden, was zu unhandlichen Großgeräten führte [4, 5, 6] . Kompakte Drucktankausführungen, in denen das Hauptfeld längs des Bandes durch Potentialteiler linearisiert [1, 7] und im allgemeinen bei Spannungen über 2, 5 MV mit Hilfe von Zwischenelektroden Feldausgleich erreicht wird [8, 9, 1O, 11, 12] , machten dagegen erhebliche Spannungssteigerungen möglich.

Ein genereller Nachteil der Bandgeneratoren ist aber, daß sie - vergleicht man sie z. B. mit Kaskadengeneratoren - sehr stromschwach sind. Kommerzielle Drucktank - Van de Graaffs mit Bandbreiten von 5O cm liefern bei einseitiger Beladung (upcharge) als maximalen Strom ca. 400 μA. Die Schwierigkeiten - lange Bänder in der Mittelebene der Bandspalte zu führen, sowie das seitliche Wandern von breiten Bändern auf den Rollen und Inhomogenitäten im Bandmaterial zu vermeiden [13] - werden durch den Einbau in einen abgeschlossenen Drucktank zusätzlich erhöht. Änderungen, Wartungsarbeiten und Durchführung von Experimenten am Generator sind schwierig und zeitraubend [14] .

Neuere Untersuchungen haben gezeigt [15] , daß die Spannungsschwankungen im wesentlichen durch das Band verursacht werden.

Bekannt gewordene Alternativen für das Band als Ladungstransportmittel sind Metallkugeln [16], Staub [17, 18], Kondensatoren [19], Öl [20], Kunststoffäden [21], sowie die in den letzten Jahten entwickelten pelletron charging chains [22, 23, 24] und laddertron chains [25, 26, 27, 28].

Zur Erreichung hoher Stromstärke sind Kunststoffäden den anderen aufgeführten Möglichkeiten weit überlegen. Dies liegt nach Bailitis [21] daran, daß die Flächengeschwindigkeit bedeutend erhöht werden kann, und die Durchbruchfeldstärke an Zylinderelektroden [29, 30] größer ist als im homogenen Feld. Ein Vergleich zwischen dem meist verwendeten Gummiband und einem Nylonband [31] zeigt außerdem, daß auf Polyamidoberflächen wesentlich höhere Ladungsdichten aufgebracht werden können.

In der vorliegenden Arbeit wird ein stromstarker elektrostatischer Hochspannungsgenerator in offener Bauweise mit einer Grenzspannung von etwa 1 MV unter Verwendung eines mit hoher Geschwindigkeit umlaufenden Polyamiddrahtes als Ladungstransportmittel vorgestellt. Es wird über den Aufbau, die Anordnung und Führung des 1, 4 mm dicken Polyamiddrahtes, das Klebeverfahren, die Be- und Entladung, Kurzschlußstrommessungen und die Erfahrungen beim Betrieb des Generators berichtet.

2. Der mechanische Aufbau

Der Generator wurde in einer 30-stufigen Grundausführung bei der Firma Polymer-Physik GmbH. u. Co. KG., Tübingen, entwickelt und im Institut für Angewandte Physik auf 42 Stufen aufgestockt und weitgehend verbessert. Er hat jetzt eine Gesamthöhe von 3, 55 m und besteht aus dem Grundgestell mit Antrieb, der Antriebsrolle und Spannvorrichtung, der Erdelektrode, dem 42-stufigen Potentialteiler und der Hochspannungselektrode, in der die obere Rolle isoliert befestigt ist. Die Abb. 1 zeigt eine Übersicht über den Aufbau des Gerätes. Das Grundgestell aus verschweißten Stahlrechteckrohren ist 72 cm hoch und über schwingungsdämpfende Filgumin-Matten und Anschlagpuffer mit dem Boden der Hochspannungshalle verschraubt.

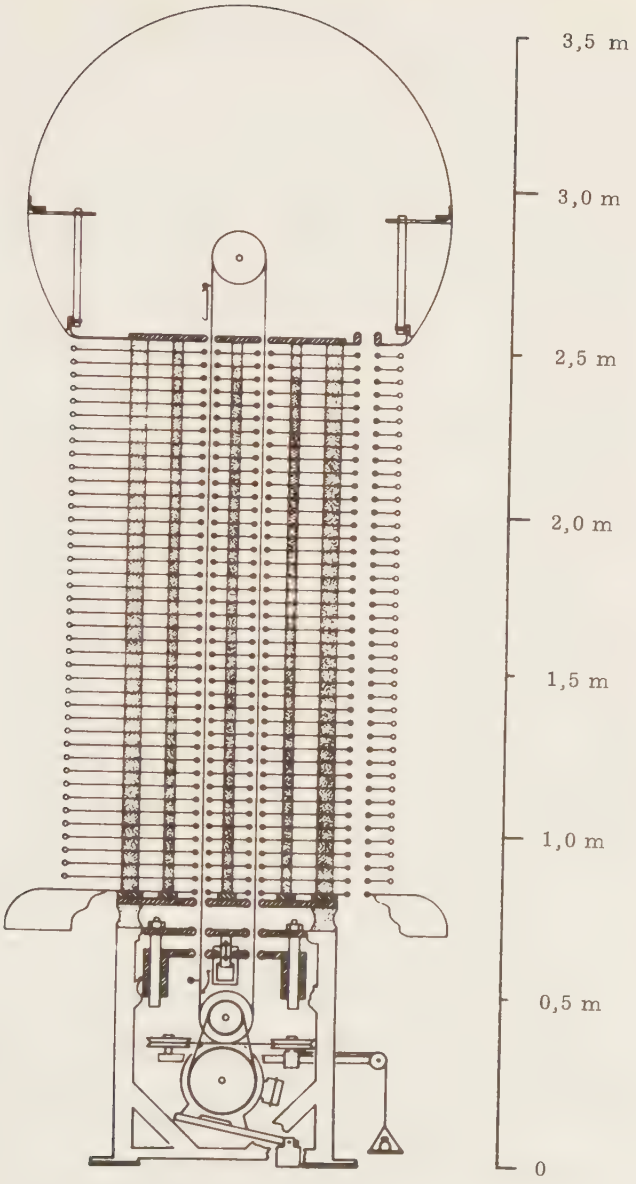

Abb. 1: Schnittzeichnung des 42-stufigen Hochspannungsgenerators. Gesamthöhe : 355 cm, Potentialteilerdurchmesser : 100 cm

2.1 Spannvorrichtung und Antrieb

Eine 20 mm starke Aluminiumplatte bildet die Oberseite des Grundgestells. An ihren Ecken sind vier Stahlrundstäbe angebracht, die als Führungsbolzen für die zweite, nach unten verschiebbare Aluminiumplatte dienen, an der die Antriebsrolle an den hängenden Lagerböcken befestigt ist. Zwei direkt vor diesen Lagerböcken eingebaute Hydraulikzylinder bilden die Spannvorrichtung.
Zur Führung des endlosen Polyamiddrahtes werden zusätzlich zwei Umlenkrollen benötigt, die am Joch zwischen beiden Lagerböcken gehaltert sind.
Der Antrieb erfolgt durch einen 11 kW Drehstromasynchronmotor der Firma Himmelwerk AG., Tübingen, mit automatischer Stern-Dreieck-Umschaltung. Die Leistungsaufnahme des Motors liegt meistens unter 8 kW. Sie hängt von der Spannung des Polyamiddrahtes ab.

Zur Kraftübertragung hat sich nach weniger erfolgreichen Vorversuchen mit Keil- und Zahnriemen der 10 cm breite und nur 1 mm dicke Flachriemen PU 11 aus mit Polyurethan beschichtetem Polyester der Firma Max Schlatterer KG., Herbrechtingen, bewährt. Beide Flachriemenscheiben sind ballig geformt und etwa 1 : 2 übersetzt, so daß die Antriebsrolle des Generators mit einer Drehzahl von 6000 U/min läuft. Da der Durchmesser der Antriebsrolle 158 mm beträgt, ergibt dies eine Geschwindigkeit des Polyamiddrahtes von $v = 50$ m/s.

2.2 Der Potentialteiler

Zur Linearisierung des Hauptfeldes zwischen Hochspannungselektrode und Erdelektrode [7] ist die Säule des Generators in 42 Stufen unterteilt. Die einzelnen Spannungsteilerplatten (ϕ = 100 cm) bestehen aus 1,5 mm dickem Aluminiumblech, dessen Rand durch Kaltverformung als Kreisring mit ca. 20 mm Durchmesser ausgebildet ist, Abb. 2.

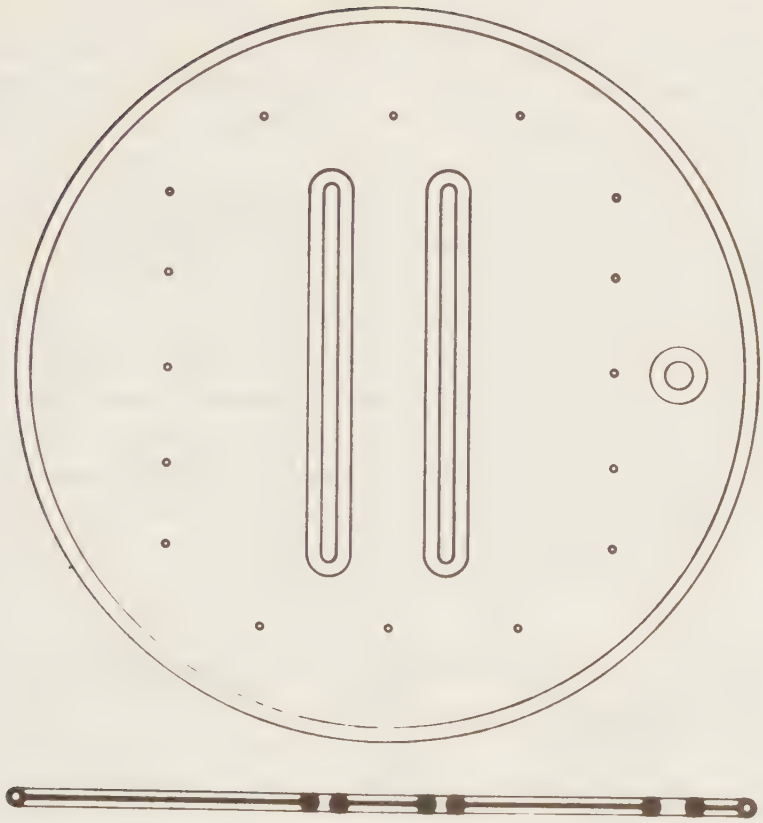

Abb. 2 : Potentialteilerplatte

Die Bandspalte (lichte Weite 18 mm) sowie die Durchführungen für Lichtleiter oder Steuerstäbe aus poliertem Aluminium (ϕ = 20 mm) sind mit Hilfe von leitendem Epoxidharz [32] mit der Teilerplatte verklebt. Für jede Stufe bilden zwei Hutmuttern aus Edelstahl, deren Abstände genau eingestellt werden können, die Schutzfunkenstrecke.
Als Material für die Isolierstützer wird ausschliesslich Plexiglas [33] verwendet. Um einen stabilen Aufbau zu erhalten, ist jede Teilerplatte zwischen 12 Isolatoren eingespannt, von denen die eine Hälfte der unteren Stufe und die andere der oberen Stufe zugerechnet werden muss.

Jeweils zwei Isolierblöcke (618mm x 50mm x 38mm) sind parallel und einer (400mm x 50mm x 38mm) senkrecht zu den Bandspalten angeordnet. Als Verbindung dieser Isolatoren mit den Teilerplatten dienen Kunststoffschrauben (Polyamid M 10 x 35), die durch Plexiglaspfropfen abgedeckt werden und versetzt übereinander angeordnet sind, Abb. 3.
Die restlichen drei Isolatoren sind Plexiglasrundstäbe ($\emptyset$ = 30 mm), die durch M 8 Gewindestangen vertikal verschraubt werden. Der Rand aller Isolatoren auf den Teilerplatten ist durch 2 mm tiefe Einschnitte hochspannungstechnisch entlastet.
Mit Ausnahme der obersten Stufe, bei der alle Isolatoren 10 mm kürzer sind, beträgt die Stufenhöhe 39, 5 mm. Der 42-stufige Potentialteiler hat eine Gesamtlänge von 164, 9 cm und ruht unterhalb der Erdelektrode auf vier Schwingungsdämpfern, die mit dem Grundgestell verbunden sind.

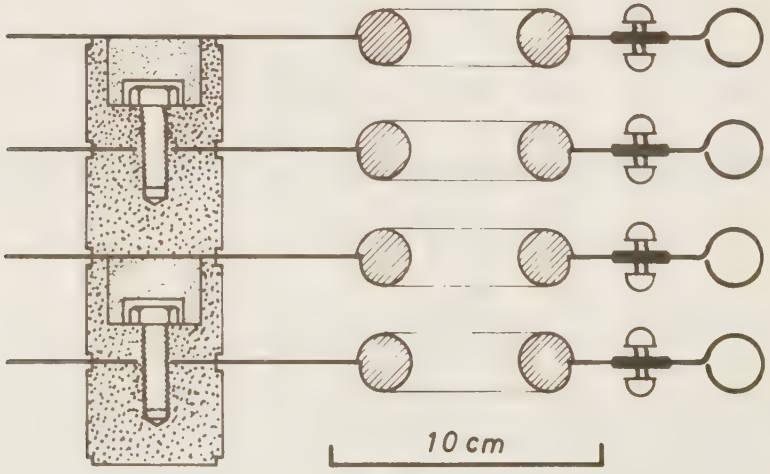

Abb. 3 : Ausschnitt des Potentialteilers mit Isolierblöcken, Durchführungen und Schutzfunkenstrecken

2.3 Die Teilerwiderstände

Zwischen die einzelnen Potentialteilerplatten werden Hochspannungswiderstände geschaltet, die für diesen Zweck folgendermassen hergestellt werden :

30 Kohleschichtwiderstände (Beyschlag, Typ B 1/2 0617) werden zunächst mäanderförmig aneinander gelötet und durch Eingiessen in kalthärtendes Epoxidharz [34] mit Quarzmehlfüllung [35] fixiert.

In einer zweiten Giessform, die mit abgeschrägten Auflageflächen, den Anschlusskappen und sichelförmigen Aussparungen für die Plexiglasrundstäbe versehen ist, entsteht dann der 320 mm lange, 40 mm breite und ca. 18 mm hohe Hochspannungswiderstand, der einfach zwischen zwei Teilerplatten gesteckt wird, Abb. 4.

Als Widerstandswert wurde für die 41 untersten Stufen je 99 MΩ± 5% und für die oberste Stufe 60 MΩ± 5% gewählt, was einen Gesamtwiderstand der Säule von 4119 MΩ± 5% ergibt.

Bei einer Generatorspannung von 1 MV fliesst ein Strom von 243 μA durch die Widerstände, wobei jeweils Teilspannungen von etwa 24 kV an den in Serie geschalteten Stufen abfallen. Eine Ausnahme macht allerdings die oberste Stufe mit 14,6 kV.

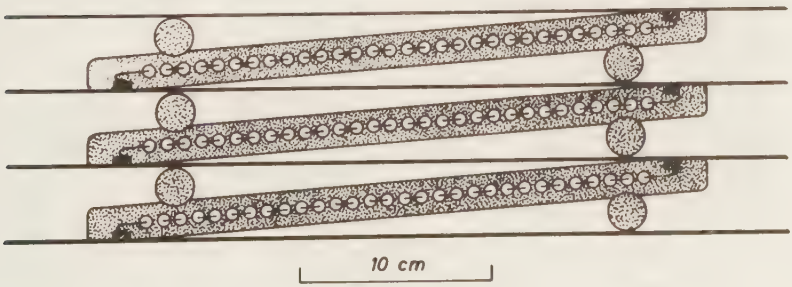

Abb. 4 : Anordnung der Teilerwiderstände

2.4 Die Hochspannungselektrode

Die oberste Stufe des Potentialteilers wird durch die letzte Teilerplatte und den Boden der Hochspannungselektrode begrenzt, der durch eine 20 mm dicke Aluminiumplatte verstärkt und mit den Isolierstützern der Säule verschraubt ist. Die Lagerböcke der oberen Rolle sind durch Plexiglasblöcke isoliert am Boden der Hochspannungselektrode befestigt. Für Experimentier-und Wartungsarbeiten kann die obere Hälfte, eine Aluminiumhalbkugel mit 126 cm Durchmesser, abgenommen werden.
Die Abb. 5 zeigt den Generator in der Hochspannungshalle des Instituts

2.5 Schwingungsdämpfende Massnahmen

Direkt neben dem Hochspannungsgenerator soll der von H. Stumpp [36] entwickelte Elektronenbeschleuniger in vertikaler Anordnung aufgebaut werden. Deshalb ist es notwendig, die Übertragung von Schwingungen über die geplante Verbindung von Generator und Beschleuniger an den beiden Hochspannungselektroden möglichst klein zu halten.
Die Antriebsrolle und die obere Rolle, sowie der Läufer des Motors wurden exakt ausgewuchtet. Schwingungsdämpfer zwischen dem Grundgestell und dem Potentialteiler und Filguminmatten an den Füssen des Grundgestells brachten eine weitere Verbesserung.
Die Schwingungsamplituden wurden mit einem induktiven Schwingwegaufnehmer B 3, dem Trägerfrequenzmessverstärker KWS / 3 S-5 und dem Konverter B 3 / Z der Fa. Hottinger - Baldwin - Messtechnik, Darmstadt, bestimmt.
Sie betragen am Boden der Hochspannungshalle weniger als 0,5 μm und auf der Hochspannungselektrode in vertikaler und horizontaler Richtung jeweils 20 μm.

Abb. 5 : Gesamtansicht des Generators

3. Die Verwendung von Polyamiddraht anstelle eines Bandes

Obwohl Eduards Bailitis schon 1960 vorgeschlagen hat, Kunststoffäden zum Ladungstransport zu verwenden [21], ist bis jetzt kein funktionstüchtiger Generator bekannt geworden, der nach diesem Prinzip arbeitet Dies liegt sicher daran, dass im Vergleich zum Bandgenerator beim Fadengenerator zusätzliche Schwierigkeiten auftreten :
So ist die Endlosführung eines Monofils aufwendiger und - falls man sie nicht beherrscht - recht problematisch, denn die einmal in Unordnung geratenen Schlingen lassen sich nur schwer entwirren. Die Verklebung von Anfang und Ende des Fadens muss so gelöst sein, dass die guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Polyamids nicht beeinträchtigt werden. Auch die Beladungsvorrichtung erweist sich als komplizierter und schliesslich treten bei hohen Drehzahlen und grossen Achslasten noch mechanische Probleme auf.
Andererseits müssen jedoch zahlreiche Vorteile gesehen werden :
Durch die Aneinanderreihung einzeln geführter, zusammenhängender Drahtschlingen wird eine fast beliebige Verbreiterung des Fadenbandes möglich, ohne dass die von breiten Bändern her bekannten Schwierigkeiten auftreten. Die Kreiszylinderoberfläche der Kunststoffschnüre ist grösser als die ebene Fläche des Bandes, wenn die parallel angeordneten Schlingen hinreichend eng geführt werden. Ausserdem kann das Fadenband mit wesentlich höherer Geschwindigkeit betrieben werden. Alle diese Fakten führen zu einer erheblichen Steigerung der Flächengeschwindigkeit und folglich zu einer Stromstärke, die um den Faktor zwei bis drei höher ist als beim Band.

3.1 Vorversuche

In umfangreichen Vorversuchen wurden Polyamiddrähte verschiedener Hersteller geprüft. Im Handel erhältlich sind sie bis zu Durchmessern von 4 mm mit Tragkräften bis über 4000 N.

Mit steigendem Durchmesser nimmt die Steifheit des Drahtes und damit die Empfindlichkeit gegen Biege- und Stauchbeanspruchung zu. Bereits nach wenigen Betriebsstunden treten deshalb bei dicken Drähten Risse auf. Bei einer Drahtgeschwindigkeit von 50 m/s erfährt dieser an der Antriebsrolle und der oberen Rolle (Abstand ca. 2,5 m) pro Sekunde 20 Umlenkungen um 180°. Schon nach knapp 14 Stunden ist deshalb jede Stelle des Polyamiddrahtes 10^6 Mal auf Biegung beansprucht worden.

Um die Lebensdauer von Polyamiddraht von 1,4 mm Durchmesser beurteilen zu können, wurden Dauerversuche bis zu 400 Stunden mit erhöhter Geschwindigkeit von 67 m/s und verkürztem Rollenabstand durchgeführt, die jedoch keine Veränderung des Polyamids oder der Klebestelle zeigten. Umgerechnet auf die Betriebsbedingungen des Generators ergibt dies eine Lebensdauer des Fadenbandes von mehr als 600 Stunden.

Die von einem Hersteller bezogenen Polyamiddrähte zeigten - was häufig bei gereckten Kunstfasern zu beobachten ist - sehr starke periodische Dickeschwankungen, die sich negativ auf die Laufruhe des Fadenbandes auswirkten. Gute Erfahrungen haben wir dagegen mit Perlon - Monofilen der Fa. MYLON, Slonek KG, Saal / Donau gemacht.

3. 2 Die Anordnung und Führung des Polyamiddrahtes

Die Antriebsrolle und die obere Rolle des Generators wurden aus einer eloxierfähigen Aluminiumlegierung angefertigt. Sie sind 50 cm lang und haben einen Durchmesser von 158 mm. Im Abstand von jeweils 1,5 mm (Mitte - Mitte) sind auf der Mantelfläche 329 Nuten mit halbkreisförmigem Querschnitt eingedreht. Diese Rillen auf den beiden Rollen bilden die Führung für jede einzelne der insgesamt 328 parallel angeordneten, zusammenhängenden Polyamiddrahtschlingen, die von Weitem wie ein Band aussehen, da der lichte Abstand zwischen den benachbarten Fäden nur 1/10 mm beträgt.

An der oberen Rolle bleibt eine Nut frei, während diese an der Antriebsrolle für die Endlosführung des Polyamiddrahtes über zwei weitere Umlenkrollen benötigt wird. Um den Aluminiumabrieb zu vermeiden und die Reibungselektrizität zwischen Faden und Rollen klein zu halten, ist die Lauffläche auf allen Rollen mit einer Harteloxalschicht vergütet. Die Abb. 6 zeigt die Anordnung und Endlosführung des Polyamiddrahtes in schematischer Darstellung. Zur besseren Übersicht sind die mit Rillen versehenen Rollen, alle Elektroden, sowie die mittleren 322 Fadenschlingen weggelassen.

Das Fadenband ist 49,2 cm breit. Die Gesamtlänge des lediglich an einer Stelle verklebten Polyamiddrahtes hängt von der Stellung der Antriebsrolle ab, die als Spannrolle dient, und liegt i. a. zwischen 1620 m und 1650 m. Hierfür werden knapp 3 kg Polyamiddraht benötigt. Die Tragkraft des 1,4 mm starken Monofils wird vom Hersteller [38] mit 648 N angegeben und ist damit fast doppelt so gross wie die des 1,0 mm dicken Polyamidfadens, den Bailitis [21] verwendete.

Zum Spannen des Fadenbandes stehen zwei Hydraulikzylinder zur Verfügung, die einen maximalen Hub von 60 mm haben. Die damit erreichbare Dehnung $\varepsilon = \Delta l/l$ des Polyamids ist kleiner als 2,5 % und bleibt stets im Hookeschen Bereich, während die Bruchdehnung erst zwischen 15 % und 35 % erfolgt.

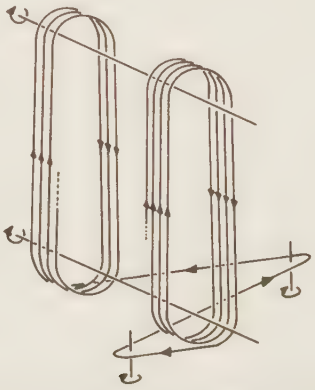

Abb. 6 : Schematische Darstellung der Anordnung und Endlosführung des Polyamiddrahtes

3.3 Die konstante Zugspannung des Polyamiddrahtes

Prinzipiell ist die überragende Scheuerfestigkeit und die sehr gute Haftreibung von Polyamid auf der Harteloxalschicht von Vorteil.
Allerdings traten deshalb anfangs auch Schwierigkeiten auf, denn die 328 zusammenhängenden Fadenschlingen sind auf ihrer Gesamtlänge von ca. 1650 m recht unterschiedlich gespannt und bleiben dies selbst nach mehrtägiger Laufzeit. Abhilfe brachte der Einbau einer Ausgleichsvorrichtung, die in Abb. 1 zu sehen ist.
Die beiden Umlenkrollen für die Endlosführung sind am Joch zwischen den beiden Lagerböcken unterhalb der Antriebsrolle befestigt. Eine dieser Umlenkrollen sitzt auf einem leicht verschiebbaren Wagen, dessen Lage durch die Kraft des gespannten Polyamiddrahtes und das Ausgleichsgewicht bestimmt ist. Nach knapp 33 Sekunden hat jede Stelle des Fadens die Ausgleichsvorrichtung einmal durchlaufen, wodurch die unterschiedlichen Zugspannungen in kurzer Zeit ausgeglichen sind. Ausserdem kann die Kraft des gedehnten Polyamiddrahtes direkt durch das Ausgleichsgewicht bestimmt werden. Sie liegt bei den üblichen Betriebsbedingungen unter 40 N, was nur 6 % der Tragkraft entspricht.

3.4 Das Einziehen und Auswechseln des Fadenbandes

Zum Auswechseln des Bandes muss in der Regel beim Bandgenerator der Potentialteiler zerlegt werden. Dies ist bei der Verwendung von Kunststoffdraht für den Ladungstransport nicht nötig.
Wird der Faden zum ersten Mal eingezogen, so verwendet man als Führungsschlinge ein etwa fünf Meter langes Drahtstück, das durch die Bandspalte über die beiden Rollen gelegt, an den Enden z. B. mit einer Lüsterklemme verbunden und gespannt wird. An dieser Führungsschlinge befestigt man dann den Anfang des Polyamiddrahtes und zieht mit Hilfe eines langsamen Antriebsmotors die ersten zehn zusammenhängenden Schlingen unter

leichter Vorspannung ein. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Anfang nacheinander in der äussersten Nut der beiden Rollen, dann in der 2., 3.,..., 10. Rille geführt wird. Anschliessend fixiert man diese Schlingen mit Klebeband, oder besser mit Hilfe eines flachen, zweiteiligen Schlittens und entfernt die Führungsschlinge wieder. Die noch fehlenden, restlichen 318 Schlingen werden dann selbsttätig durch den langsamen Antriebsmotor eingezogen, wobei der Polyamiddraht spiralenähnlich zwischen den Rillen der beiden Rollen läuft. Der Anfang des 1650 Meter langen Polyamiddrahtes muss danach mit dem Ende verklebt und zum Schluss in die Umlenkrollen für die Endlosführung gelegt werden.
Wesentlich einfacher sind die Verhältnisse, wenn der Faden nicht neu eingezogen, sondern nur ein altes, evtl. verschmutztes oder beschädigtes Fadenband durch ein neues ersetzt werden soll. Hierzu wird der alte Polyamiddraht zwischen den Umlenkrollen durchgeschnitten und der Anfang des neuen Fadens mit dem Ende des alten verklebt. Während der alte Faden herausgezogen und aufgewickelt wird, kann so der neue automatisch eingefädelt werden.

3.5 Das Klebeverfahren

Von grundsätzlicher Bedeutung für einen zuverlässigen Betrieb des Fadengenerators ist, dass die Klebestelle die hervorragenden mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Polyamids nicht beeinträchtigt. Durch die bekannten Schweissverfahren [38] sind Verbindungen möglich, die zwar hohen Zugspannungen standhalten, bei häufiger Wechselbiegebeanspruchung jedoch versagen. Das von K. Willutzki [39] entwickelte Klebeverfahren hatte diesen Nachteil nicht, war jedoch wegen seiner hohen Versagerquote stark verbesserungsbedürftig.
Um eine grosse Klebefläche der zu verbindenden Polyamiddrahtenden zu erhalten, werden diese keilförmig angeschrägt. Dazu schiebt man das Ende des Drahtes durch die an der Stirnseite eines Kunststoffblockes

liegende Öffnung einer Bohrung, die so angeordnet ist, daß sie die Oberfläche unter geringem Neigungswinkel durchstößt. Eine Motorfräse, die parallel zur Oberfläche verschoben wird, schneidet das Drahtende in der stets gleich bleibenden Form ab. Die derart zugeschnittenen beiden Enden werden in einer zweiteiligen Pressform so justiert und befestigt, daß sie exakt zusammenpassen. Dann löst man die beiden Schnittflächen mit konzentrierter Ameisensäure an, bestreicht sie dünn mit einer Lösung von Polyamid in Ameisensäure und schließt die Klebepresse. Um beurteilen zu können, ob die Schnittflächen exakt aufeinanderliegen, wird als Material für die Klebepresse zweckmäßigerweise Plexiglas verwendet, das dünn mit Teflon beschichtet ist. Unter hohem Druck und Wärmezufuhr zur Beschleunigung der Polymerisation muß die Pressform knapp eine Stunde lang geschlossen bleiben. Danach wird die Klebestelle entgratet und geprüft.

Dieses Klebeverfahren hat sich als äußerst zuverlässig erwiesen, denn während der mehrere Jahre langen Betriebszeit des Generators kam es zu keinem Bruch des Fadens.

Dehnungsversuche an geklebtem Polyamiddraht zeigten außerdem, daß die Zerreißgrenze erst bei Dehnungen über 15 %, d.h. im Bereich der Bruchdehnung des ungeklebten Drahtes, auftrat.

4. Der Ladungstransport auf der Polyamiddrahtoberfläche

In einem Medium, in dem die elektrische Festigkeit durch die Durchbruchfeldstärke $\vec{E}_d$ begrenzt ist, läßt sich eine Isolatoroberfläche F höchstens so lange mit Ladungen belegen, bis das von diesen freien Ladungen ausgehende Feld, meist Transportfeld $\vec{E}_t$ genannt, betragsmäßig gleich der Durchbruchfeldstärke wird. Zwischen der Flächenladungsdichte σ und dem von der Ladung Q ausgehenden und als homogen angenommenen Feld $\vec{E}_t$ besteht die Beziehung:

$$\sigma = \frac{Q}{F} = \varepsilon \varepsilon_o E_t \leq \varepsilon \varepsilon_o E_d \qquad (1)$$

Der Isolator und mit ihm die auf seiner Oberfläche sitzende Ladung wird mechanisch in das Innere der Hochspannungselektrode gebracht.
Deshalb erhält man für die Stromstärke I das Produkt aus der Flächenladungsdichte σ und der pro Zeiteinheit für den Ladungstransport zur Verfügung stehenden Fläche F:

$$I = \sigma \cdot F/t = \varepsilon \varepsilon_0 E_t F/t \qquad (2)$$

Bei Bandgeneratoren war lange Zeit ungeklärt, ob auf jeder Seite des Bandes [4, 5, 40] oder nur einseitig eine Ladungsbelegung bis zum σ_{max}-Wert möglich ist.
Aus der Überlegung, daß die zur Bandbeladung nötige Sprühentladung gerade dann erlischt, wenn sich so viele Ladungen auf der Isolatoroberfläche befinden, daß das Feld zwischen Beladekamm und Band verschwindet, schloß Kossel [41], daß für influenzbeladene Bänder nur die einseitige Ladungsbelegung möglich ist.
Wird die Durchbruchfeldstärke in Luft zu $E_d = 30$ kV/cm angenommen, so erhält man aus der Gleichung (1) als maximale Oberflächenladungsdichte:

$$\sigma_{max} = \varepsilon \varepsilon_0 E_d = 2{,}65 \cdot 10^{-9} \text{ As/cm}^2 \qquad (3)$$

Außer bei der Übererregungsschaltung [11, 41, 42, 43, 45, 46, 47], die sich wegen des hohen Bandabriebs der aufeinander gleitenden Bandhälften in der Praxis nicht bewährte, ist dieser Wert in Bandgeneratoren offener Bauweise nur von Flammersfeld und Weber [40] mit Hilfe von Zusatzelektroden in der Beladevorrichtung erreicht und von Bailitis [54] übertroffen worden.
Je mehr beladene Fläche pro Zeiteinheit zur Verfügung steht, desto höher ist der Strom, der zur Hochspannungselektrode transportiert werden kann. Die Verbreiterung des Bandes und die Erhöhung der Bandgeschwindigkeit stößt jedoch auf mechanische Grenzen. Deshalb werden oft mehrere Bänder verwendet [44]. Belädt man zusätzlich die von der Hochspannungselektrode zur Erdelektrode bewegte Bandhälfte durch eine Umladungsvorrichtung mit Ladungen der entgegengesetzten Polarität (downcharge), so ist eine Verdoppelung der Stromstärke möglich.

Nach Paschen [55] steigt die Durchbruchfeldstärke in Gasen weitgehend proportional zur Erhöhung des Druckes an. Dies führt in kommerziellen Drucktankanlagen zwar zu einer Erhöhung der Flächenladungsdichte, jedoch bleiben die erreichten Werte nach Letournel [13] mit $4 \cdot 10^{-9}$ As/cm^2 recht bescheiden.

In der Tabelle 1 sind die Daten für Generatoren in offener Bauweise aus den Angaben in der Literatur (erste Spalte) über die Anzahl a der verwendeten Bänder, die Bandbreite b, die Bandgeschwindigkeit v, die ggfs. benutzte Umladungsvorrichtung UL, die jeweilige Flächengeschwindigkeit $F/t = bv$ und die erreichte Stromstärke I zusammengestellt und hieraus die Flächenladungsdichte σ berechnet worden.

4.1 Die Flächengeschwindigkeit des Fadenbandes

Verwendet man runde Kunststoffschnüre vom Radius r für den Ladungstransport, so kann die Flächengeschwindigkeit auf drei verschiedene Weisen definiert werden:

Von den Bandgeneratoren her üblich und für den Raumbedarf entscheidend ist die Breite b des Fadenbandes, das durch die zwei äussersten Drahtschlingen begrenzt ist und als Flächengeschwindigkeit

$$F_a/t = bv \qquad (4)$$

ergibt. Bei einer Breite von 49,2 cm und der Geschwindigkeit von 50 m/s ist für unseren Generator die Flächengeschwindigkeit $F_a/t = 24{,}6$ m^2/s. Bailitis dagegen bezieht sich in [21] auf den Diametralschnitt der Fäden, wobei die Zwischenräume der z Fadenschlingen nicht berücksichtigt werden:

$$F_b/t = 2zrv \qquad (5)$$

Da der Drahtdurchmesser der 328 Schlingen 1,4 mm beträgt, ergibt dies 23 m^2/s als Flächengeschwindigkeit und unterscheidet sich nur wenig von der ersten Definition, da die Fadenschlingen sehr eng angeordnet sind. Dagegen gibt Bailitis eine Breite der Fadenwand von 14 cm und als Diametralschnitt 8,4 cm an, was zu $F_a/t = 5{,}6$ m^2/s und $F_b/t = 3{,}36$ m^2/s führt.

Tabelle 1

	a	b cm	v m/s	UL	F/t m^2/s	I µA	σ $10^{-9}\frac{C}{cm^2}$	$\%\sigma_{max}$
Van de Graaff [4]	1	5,6	17,8	ja	2,0	25	1,25	47
Tuve et al [5]	1	15,2	30,5	ja	9,3	90	0,97	37
	1	30,4	20,3	ja	12,3	180	1,46	55
	2	50,8		ja		750	1,14	43
Van Atta et al [6]	2	119,0	23,0	ja	106,9	1750	1,60	60
	2	119,0	29,0	ja	138,0	2100	1,50	56
	2	119,0	29,0	ja	139,0	1950	1,40	53
Herb et al [7]	2	33,0	14,3	-	9,5	200	2,11	79
Baumhauer et al [48]	1	10,0					1,70	65
	2	40,0					1,75	66
Trump et al [49]	1	35,5	25,4	ja	18,1	370	2,02	75
Collins et al [50]	2	76,2	21,3	-	16,2	400	1,18	46
Wells et al [51]	2	45,7	25,4	ja	23,2	500	1,08	40
v. Ardenne [52]	1	40,0	25,0	ja	20,0	400	2,00	75
Flammersfeld,	1	60,0	15,0	ja	18,0	280	1,55	58
Weber [40]	1	mit Zusatzelektroden				480	2,66	100
Kessler [47]	1	31,0	3,7	-	1,2	23	2,00	75
Walter et al [53]	1	53,0	20,0	ja	20,6	330	1,60	60
Bailitis [54]	1	20,0	28,0	-	5,6	168	3,00	113
Bailitis [21] *	1	14,0	40,0	-	5,6	137	2,45	91
Verfasser *	1	49,2	50,0	-	24,6	720	2,93	111

Bezeichnungen :

a	: Anzahl der verwendeten Bänder
b	: Bandbreite in cm
v	: Bandgeschwindigkeit in m/s
UL	: Umladungsvorrichtung (downcharge)
F/t	: Flächengeschwindigkeit in m^2/s
I	: Stromstärke in µA
σ	: Flächenladungsdichte in Einheiten von 10^{-9} As/cm^2
$\%\sigma_{max}$	: Flächenladungsdichte bezogen auf die Durchbruchfeldstärke in Luft E_d = 30 kV/cm
*	: Fadengeneratoren

Die dritte Möglichkeit besteht darin, als Bezugsfläche die halbe Mantelfläche der z Kreiszylinder zu wählen:

$$F_c/t = \pi z r v \qquad (6)$$

Dies ergibt bei uns 36 m^2/s und bei Bailitis 5,3 m^2/s für die so definierte Flächengeschwindigkeit.

4.2 Die Be- und Entladung des Polyamiddrahtes

Die Beladung des Fadenbandes erfolgt durch Fremderregung in einer Sprühentladung bei Spannungen zwischen 6 kV und 30 kV. Um Durchschläge zwischen den Fadenschlingen vom Beladekamm zur geerdeten Antriebsrolle zu verhindern, wurde diese mit einem Isoliermantel aus Plexiglas abgedeckt [21], was sich jedoch im Dauerversuch wegen der stets vorhandenen mechanischen Spannungen bei hohen Drehzahlen und großen radialen Achslasten nicht bewährte. Zusätzliche getrennte Beladerollen [39] sind insbesondere für den Transport von positiver Ladung vorzuziehen. Als Beladekämme wurden dünne Drähte oder Metallfolien, Metallnetze, streifende Bürsten aus Kupferlitze und nebeneinander angeordnete Rasierklingen erprobt. Die Beladung mit streifenden Kämmen ist zwar bei niedrigeren Beladespannungen möglich. Es treten jedoch durch den hohen Abrieb und als Folge davon Instabilitäten während des Betriebes auf. Deshalb wurde der Beladekamm im allgemeinen in einem Abstand von etwa einem Millimeter vor dem Fadenband angebracht.
Dünne Drähte und leichte Metallfolien kommen in dem bei hoher Fadengeschwindigkeit (180 km/h) auftretenden Luftstrom sehr leicht zum Schwingen, was sich in periodischen Stromschwankungen bemerkbar macht.

Zur negativen Beladung des Fadenbandes hat sich die in Abb. 7 skizzierte Anordnung bewährt, die ohne Beladerolle arbeitet. Als Beladekamm werden Metallfolien oder Rasierklingen benützt, die in einem geschlitzten Rundstab aus Aluminium gehaltert und mit der Beladekaskade verbunden sind.
Als Gegenelektrode wird eine speziell gewölbte Form aus Edelstahl benutzt, die

über einen Hochspannungswiderstand (R = $10^9 \Omega$) zum Schutz gegen Durchschläge geerdet ist. Die erreichbare Stromstärke hängt entscheidend von der Lage der Gegenelektrode und des Beladekammes ab und muss optimal justiert werden. Die Abnahme der Ladung erfolgt innerhalb der Hochspannungselektrode durch einen Abnahmekamm, der isoliert befestigt und mit der oberen Rolle sowie der Hochspannungselektrode elektrisch verbunden ist.

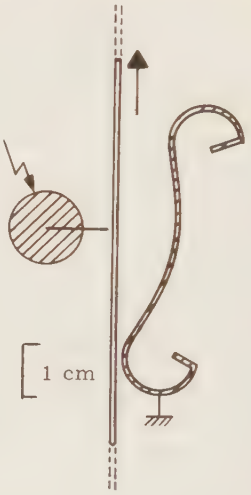

Abb. 7 : Anordnung zur negativen Beladung des Polyamiddrahtes

4.3 Der Kurzschlusstrom

Da der Ladungstransport auf bewegten Isolatoroberflächen erfolgt, ist der elektrostatische Generator als Stromquelle mit hohem Innenwiderstand anzusehen.

Wenn man die über den Abnahmekamm fliessende Ladungsmenge nicht der Hochspannungselektrode zuführt, sondern über ein Messinstrument erdet, so sind Kurzschlusstrommessungen möglich. Um die Schwankungen dieses Stromes zu messen, verwendet man zweckmässigerweise ein Katodenstrahloszilloskop mit kurzem Messkabel.

Wird das Fadenband mit der in Abb. 7 gezeigten Anordnung negativ beladen, so setzt sich der Kurzschlusstrom aus einem weitgehend konstanten Gleichstromanteil und sehr steilen Spitzen zusammen. Diese Strompulse können im dunkeln als Gleitentladungen von einzelnen Polyamiddrahtstellen zum Abnahmekamm direkt beobachtet werden. Ihre Anzahl und Höhe

hängt von der Stellung des Abnahmekammes innerhalb der Hochspannungselektrode und von der Grösse des Kurzschlusstromes ab.
Sie können jedoch weitgehend kompensiert werden. Bringt man zwischen Abnahmekamm und Bandeintrittsspalt der Hochspannungselektrode eine isolierte Platte als Zusatzelektrode an und misst die Kurzschlusstromstärke mit einem Zweistrahloszilloskop (Philips PM 3234, Eingangsshunt jeweils 111 kΩ parallel zu 1 MΩ und 20 pF), dessen erster Eingang mit dieser Platte, der zweite mit dem Abnahmekamm verbunden ist, so erhält man den in Abb. 8 gezeigten Stromverlauf.
Die negativen Pulse treten nach wie vor am Abnahmekamm auf, werden jedoch gleichzeitig mit entgegengesetztem Vorzeichen und geringfügig kleinerer Amplitude auf der Zusatzelektrode registriert.
Verbindet man diese mit dem Abnahmekamm, so ist die Höhe der Strompulse um den Faktor 30 geringer, Abb. 9.
Eine weitere Glättung des Stromes wird erreicht, wenn zwischen Abnahmekamm und Hochspannungselektrode bzw. Oszilloskopeingang ein Hochspannungswiderstand geschaltet wird. Je nach Messanordnung wirkt die Erdkapazität des Generators (ca. 70 pF) oder die Eingangskapazität des Oszilloskops (20 pF) in Verbindung mit diesem Widerstand als R C - Siebglied. Wählt man den Widerstandswert zu 34 MΩ, so fällt bei einem Strom von 250 μA zwischen Abnahmekamm und Oszilloskopeingang eine Spannung von 8,5 kV ab, und man erhält den in Abb. 10 gezeigten Stromverlauf.
Die Abhängigkeit des Kurzschlusstromes I_k von der Beladespannung U_b ist in Abb. 11 wiedergegeben.
Zur negativen Beladung des Fadenbandes wurde eine Hochspannungskaskade der Fa. Brandenburg (Modell 868 R, 50 kV / 2mA) in der Anordnung von Abb. 7 mit einem Schutzwiderstand von 10^9 Ω zwischen Gegenelektrode und Masse verwendet.
Der Maximalwert der Kurzschlusstromstärke von I_{kmax} = 720 μA ist dadurch begrenzt, dass in der Beladungsvorrichtung Durchschläge vom Beladekamm zur Gegenelektrode auftreten.

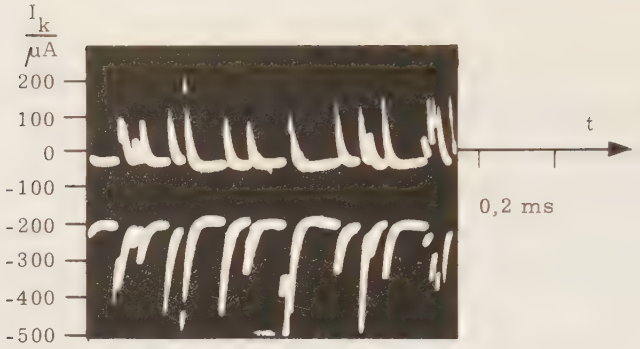

Abb. 8 : Die durch Gleitentladungen auf der Zusatzelektrode (oben) und am Abnahmekamm (unten) verursachten Strompulse

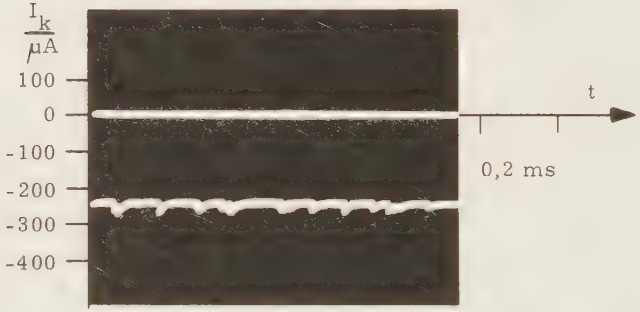

Abb. 9 : Restwelligkeit des Kurzschlusstromes, wenn Zusatzelektrode, obere Rolle und Abnahmekamm verbunden sind

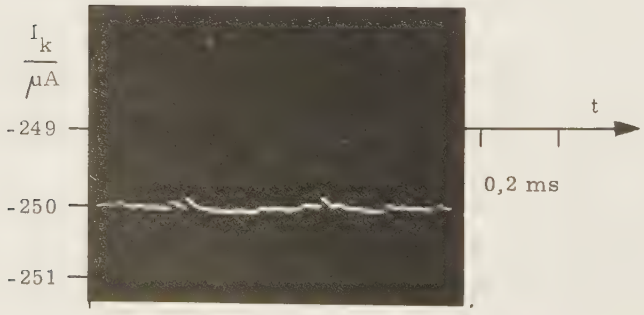

Abb. 10 : Restwelligkeit nach zusätzlicher Glättung durch das RC-Siebglied

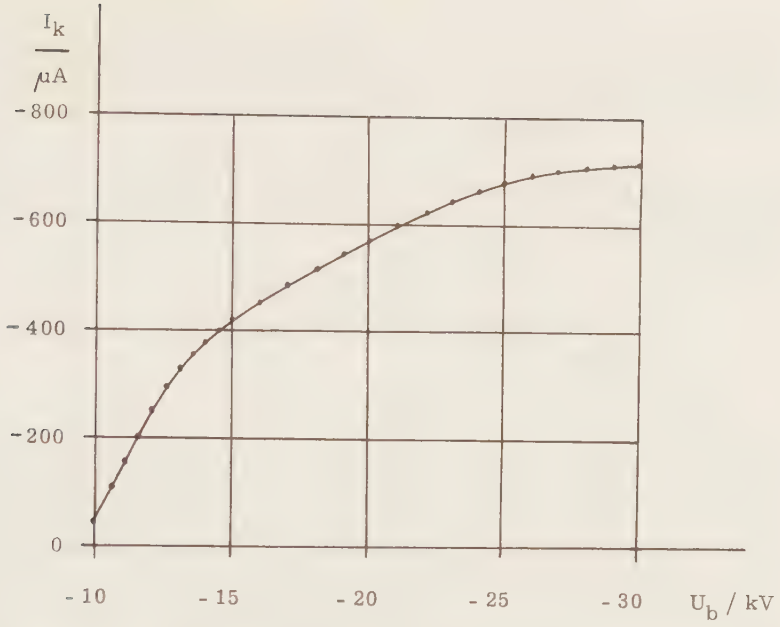

Abb. 11 : Der Kurzschlusstrom I_k als Funktion der Beladespannung U_b

4.4 Die maximale Flächenladungsdichte und Transportfeldstärke

Aus der Gl. (2) kann die maximale Flächenladungsdichte σ_{max} bei einem Kurzschlusstrom von 720 µA berechnet werden.
Dabei ergeben sich drei verschiedene Werte, wenn man die Flächengeschwindigkeit F / t wie im Abschnitt 4.1 definiert :

$$\sigma_{a_{max}} = \frac{I_k \cdot t}{F_a} = 2{,}93 \cdot 10^{-9} \ \frac{As}{cm^2}$$

$$\sigma_{b_{max}} = \frac{I_k \cdot t}{F_b} = 3{,}13 \cdot 10^{-9} \ \frac{As}{cm^2}$$

$$\sigma_{c_{max}} = \frac{I_k \cdot t}{F_c} = 2{,}00 \cdot 10^{-9} \ \frac{As}{cm^2}$$

Ebenfalls aus Gl. (2) kann der Maximalwert der Transportfeldstärke abgeschätzt werden :

$$E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_c} \qquad (7)$$

Mit $\varepsilon = 1$ und der elektrischen Feldkonstanten $\varepsilon_c = 8{,}859 \cdot 10^{-14}$ As/Vcm ergibt dies :

$$E_{ta_{max}} = 33{,}1 \text{ kV/cm}$$

$$E_{tb_{max}} = 35{,}3 \text{ kV/cm}$$

$$E_{tc_{max}} = 22{,}5 \text{ kV/cm}$$

Wie aus der Tabelle 1 (Seite 18) ersichtlich, wurde zum Vergleich mit bekannten Generatoren in offener Bauweise die Flächengeschwindigkeit F_a/t der Berechnung der Flächenladungsdichte zugrunde gelegt.
Der mit unserem Generator erreichte Maximalwert der Flächenladungsdichte wurde bisher lediglich von Bailitis [54] an einem Bandgenerator mit besonders engen, zur Hochspannungserzeugung allerdings weniger gut geeigneten Bandspalten geringfügig übertroffen.

5. Die Erzeugung hoher Gleichspannungen mit dem Fadengenerator

Der Grundvorgang besteht in der Verrichtung mechanischer Arbeit beim Ladungstransport in dem zwischen Hochspannungs- und Erdelektrode bestehenden Hauptfeld $\vec{E}_h$.
Nach Neubert [19] kann der elektrostatische Generator als Gleichstromumformer aufgefasst werden, der den Strom der Beladespannung U_b in Gleichstrom der Hochspannung $U = Q/C$ transformiert. Sie ist durch die Ladungsmenge Q auf der Hochspannungselektrode (durch die Summe der zu- und abfliessenden Ströme) und durch deren Kapazität C bestimmt. Bleibt das durch den Ladungstransport verursachte Transportfeld $\vec{E}_t$ zunächst unberücksichtigt, so hängt die erreichbare Hochspannung nur vom Hauptfeld $\vec{E}_h$ ab. Deshalb muss auf eine günstige Form und Grösse der Hochspannungselektrode geachtet werden [5, 19, 41, 56, 57, 58].

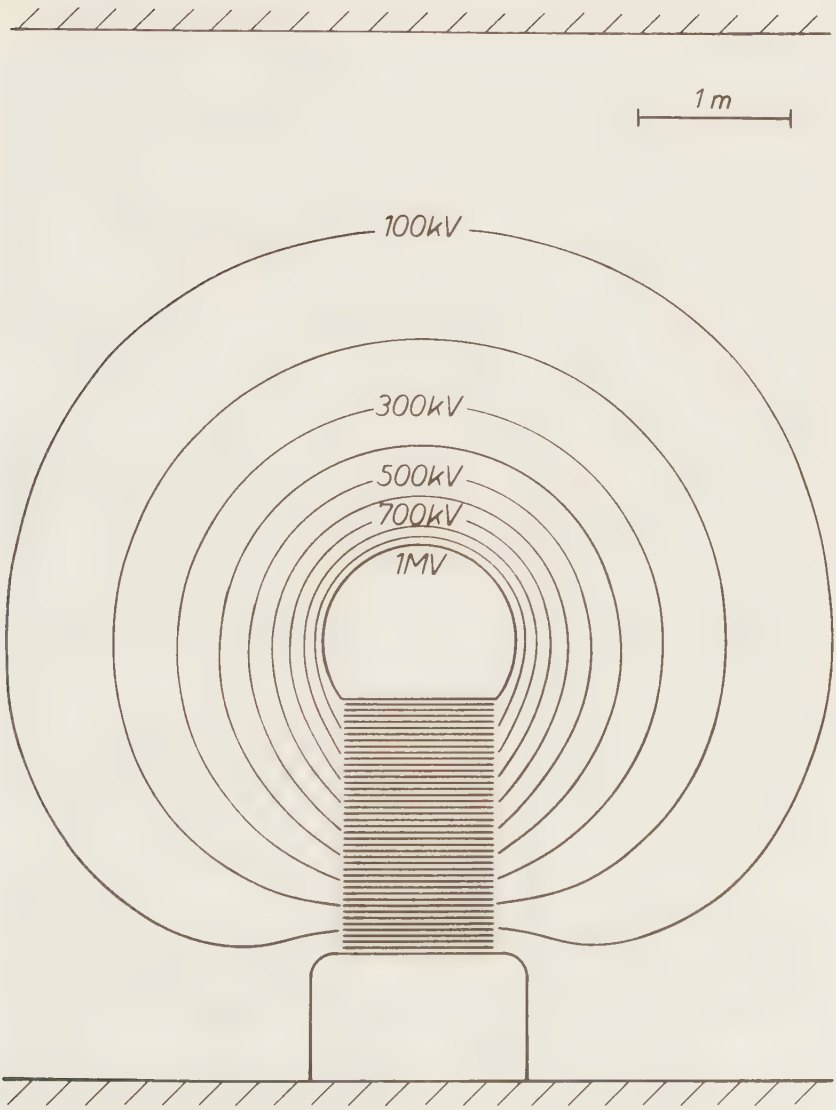

Abb. 12 : Äquipotentiallinien des Hauptfeldes bei einer Generatorspannung von 1 MV

In Abb. 12 ist die von H. Stumpp im Zentrum für Datenverarbeitung der Universität Tübingen berechnete Potentialverteilung des Hauptfeldes unseres Generators bei einer Spannung von 1 MV wiedergegeben. Von Interesse ist hierbei, daß im mittleren und oberen Teil der Säule die Äquipotentiallinien schräg nach oben verlaufen. Dies erklärt die gewonnene Erfahrung, daß hier auf den Außenrändern evtl. vorhandene Staubteilchen nur geringen Einfluß auf die Grenzspannung des Generators haben, da es eine Stelle auf der Elektrode gibt, wo die elektrische Feldstärke null ist.

Die maximale Feldstärke des Hauptfeldes beträgt an der Hochspannungselektrode 18 kV/cm, wenn man den Abstand der geerdeten Wände berücksichtigt. Im Potentialteiler ist dagegen das Hauptfeld entlang dem Band kleiner und weitgehend linearisiert.
Dies ist notwendig, da das von den freien Ladungen auf dem Band ausgehende Transportfeld $\vec{E}_t$ sich dem Hauptfeld $\vec{E}_h$ überlagert, wobei die resultierende Vektorsumme nach Bailitis [59] durch die Durchbruchfeldstärke $\vec{E}_d$ begrenzt ist.
Nimmt man beide Felder als homogen und senkrecht zueinander an, so führt dies zu der Bedingung:

$$E_h^2 + E_t^2 \leq E_d^2 \qquad (8)$$

Den stabilen Arbeitsbereich dieses idealisierten Generators erhält man aus Gl. (2) und (8), sowie der Beziehung $E_h = U/l$ (l : Abstand zwischen Hochspannungs- und Erdelektrode):

$$\frac{U^2}{l^2} + \frac{I^2 \cdot t^2}{(\varepsilon \varepsilon_o F)^2} \leq E_d^2 \qquad (9)$$

Nur im Kurzschlußstrombetrieb ist folglich die durch Gl. (1) definierte Flächenladungsdichte erreichbar. Beim Betrieb des Generators wird der Ladungstransport zusätzlich durch das Hauptfeld begrenzt:

$$\sigma_h \leq \varepsilon \varepsilon_o (E_d^2 - E_h^2)^{1/2} \qquad (10)$$

In der Praxis sind die Verhältnisse jedoch komplizierter, da an den Bandspalten Feldinhomogenitäten auftreten [60] und die beiden Felder nur an wenigen Stellen genau senkrecht zueinander verlaufen. Dies kann durch Felderhöhungsfaktoren [54] berücksichtigt werden..

5.1 Die Messung der Hochspannung

Wird der Generator im stabilen Arbeitsbereich betrieben, so treten weder Koronaentladungen noch Durch- oder Überschläge auf.
Dies ist wichtig, wenn die Generatorspannung über den Potentialteilerstrom gemessen wird. Durch Sprühentladungen oder Kriechströme zwischen den Potentialteilerplatten entstehen Stromverzweigungen, die eine Veränderung des Widerstandswertes der Säule bewirken.
Einzelne punkt- oder büschelförmige Koronaentladungen werden an den Teilerplatten i. a. bei angelegten negativen Hochspannungen von 30 kV bis 40 kV pro Stufe beobachtet. Sie haben Entladungsströme von wenigen μA zur Folge. Wenn sie durch Staub- oder Faserteilchen verursacht werden, erlöschen sie meistens nach einiger Zeit, was man beim Konditionieren des Generators ausnutzt. Allerdings muss hierbei der Laststrom durch die Teilerwiderstände stets gross gegenüber den durch Koronaentladungen hervorgerufenen Sprühströmen sein, weil sonst die Generatorspannung im Grenzbereich zu stark abfällt. Aus diesem Grunde wurden die anfangs verwendeten Teilerwiderstände von 1000 MΩ pro Stufe durch die in 2.3 beschriebenen 99 MΩ - Widerstände ersetzt, die sich sehr gut bewährt haben, da sie nach fünfjähriger Betriebsdauer noch alle funktionstüchtig sind.
Durch die Erhöhung des Potentialteilerstromes auf 243 μA bei 1 MV (in der 30 - stufigen Ausführung : 250 μA bei 750 kV) ist sichergestellt, dass die durch Koronaentladungen im Grenzspannungsgebiet verursachten Widerstandsänderungen des Teilers im Bereich von wenigen % bleiben.
Der Kriechstrom über die Plexiglasisolatoren wurde jeweils bei einer Prüfspannung von - 30 kV bestimmt [61, 62, 63]. Da er an allen Stufen kleiner als 3 nA ist, kann er unberücksichtigt bleiben, was deutlich für die ausgezeichneten Isolationseigenschaften von Plexiglas spricht.
Langsame Spannungsschwankungen lassen sich folglich mit einem Kompensationsschreiber aufzeichnen, dessen Eingangswiderstand in Reihe zu den Teilerwiderständen der Säule geschaltet ist.

Zur Messung schnellerer Spannungsänderungen kann man die Niederspannungsseite des untersten Teilerwiderstandes mit der isolierten Erdelektrode und dem Eingang eines Katodenstrahloszilloskopes verbinden. Zusätzlich zum ohmschen Widerstand der Säule wird dann die Kapazität der Hochspannungselektrode über die Teilerplatten zur Erdelektrode wirksam. Der Übertragungsfaktor dieses aus ohmschen und kapazitiven Komponenten bestehenden Teilers ist jedoch stark frequenzabhängig. Ausserdem zeigt sich bei Kurzschlusstrommessungen, dass geringfügige Schwankungen der Ladungsverteilung auf dem Fadenband und kleinste Abstandsänderungen der einzelnen Polyamiddrahtschlingen am Bandspalt der Erdelektrode Signale influenzieren, die am Oszilloskop mit einigen Volt (Spitze - Spitze) gemessen werden und dadurch Spannungsschwankungen des Generators vortäuschen, die in dieser Form und Grösse nicht vorliegen.
Übersichtlicher werden die Verhältnisse, wenn das z. Zt. von H. Stumpp [36] entwickelte Elektronenbeschleunigungsrohr fertiggestellt ist.
Zur Beurteilung der Stabilität des Generators unterhalb der Grenzspannung werden unter den jeweiligen Versuchsbedingungen Kurzschlusstrommessungen durchgeführt (s. 5.4).

5.2 Der Fadengenerator in der 30 - stufigen Ausführung

Ausgehend von den Erfahrungen an zwei von K. Willutzki [39, 64] gefertigten, verbesserungsfähigen Fadengeneratoren wurde nach umfangreichen Vorversuchen der neue Generator bei der Fa. Polymer-Physik GmbH & Co KG, Tübingen, entwickelt.
Er besass im Gegensatz zu dem im Abschnitt 2 beschriebenen Aufbau nur 30 Potentialteilerstufen, hatte noch keine Ausgleichsvorrichtung für die konstante Zugspannung des Polyamiddrahtes (s. 3.3) und keine Schwingungsdämpfer (s. 2.5) , sowie eine andere Antriebs- und Spannvorrichtung.

Die positive Beladung des Fadenbandes (Gesamtlänge des Polyamiddrahtes ca. 1280 m) erfolgte durch Fremderregung mit einer symmetrischen, zweistufigen Hochspannungskaskade und einem Vorwiderstand von 30 MΩ.

Da die Potentialverteilung der Glimmentladung an der positiven Spitze sich grundlegend von der an der negativen Spitze unterscheidet [30, 65], ist die positive Beladung des Fadenbandes mit der in Abb. 7 beschriebenen Anordnung nicht möglich.

Hierzu wird eine zwischen Antriebsrolle und Erdelektrode angebrachte Beladerolle benötigt (s. 4.2), deren geerdeter Metallkern ($\varnothing$ = 10 cm) mit einem 2,5 mm dicken Isoliermantel aus kalthärtendem Epoxidharz [34] überzogen war.

Die Messung der erreichten Hochspannung des Generators erfolgte, wie in 5.1 erläutert, durch die Registrierung des Teilerstromes mit einem Kompensationsschreiber (Metrawatt, Servogor 2 S/RE 571).

Typische Ausschnitte dieser Schreiberdiagramme sind in der Abb. 13 zusammengestellt. Sie zeigen, dass die Grenzspannung des 30-stufigen Generators bei positiver Polarität knapp unter 800 kV liegt.

In dieser Messreihe erfolgte der erste Durchschlag an den Sollfunkenstrecken zwar schon bei 730 kV. Steigert man die erzeugte Hochspannung jedoch langsam weiter, so arbeitet der Generator nach einiger Zeit wieder stabil (hier z.B. Konditionieren auf 750 kV). Erst bei Annäherung an die Grenzspannung erfolgen i.a. etwa fünf Durchschläge pro Minute.

Die Stabilität der Generatorspannung beträgt in Übereinstimmung mit den Kurzschlusstrommessungen ohne Stabilisierungsmassnahmen $\Delta U/U = 2\%$.

Zur Erzeugung der negativen Hochspannung wurde anfangs wie beim + Betrieb dieselbe Beladerolle und die umgepolte symmetrische Kaskade verwendet. Auch hier zeigte sich, dass die Grenzspannung bei ca. - 800 kV liegt. Als störend und für die Stabilität der Hochspannung von wesentlichem Nachteil erwiesen sich jedoch die ab - 700 kV auftretenden Durchschläge zwischen benachbarten Bandspalten, die als kurzzeitiger Anstieg in der Abb. 14 registriert werden.

Abb. 13 : Typische Ausschnitte der über den Potentialteilerstrom gemessenen positiven Hochspannung des 30 - stufigen, unstabilisierten und zur Bandbeladung mit einer separaten Beladerolle versehenen Fadengenerators

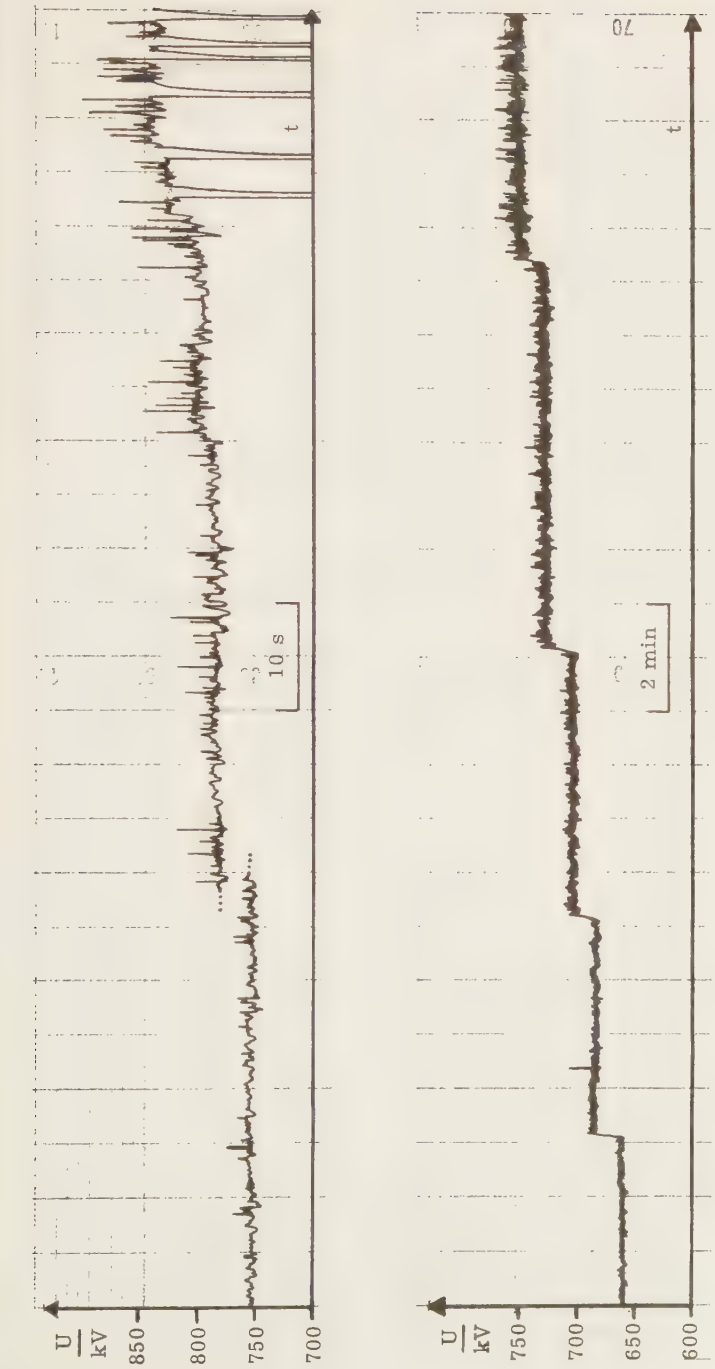

Abb. 14 : Die mit dem unstabilisierten 30-stufigen Fadengenerator erzeugte negative Hochspannung.
Beladung des Fadenbandes mit einer separaten Beladerolle

Eine entscheidende Verbesserung der Stabilität und die Erhöhung der maximal erreichbaren negativen Hochspannung auf - 880 kV brachten einmal der Umbau der Beladungsvorrichtung, in der die Beladerolle durch die in der Abb. 7 gezeigte gewölbte Gegenelektrode ersetzt wurde, sowie die gelegentliche Reinigung der Bandspalte.
Schon bei den Kurzschlusstrommessungen zeigte sich, dass die neue Beladungsvorrichtung stabiler arbeitet. Deshalb konnte der Vorwiderstand zwischen Kaskade und Beladekamm von 30 MΩ auf 10 MΩ herabgesetzt und die Zündeigenschaften der Beladungssprühstrecke verbessert werden.
Die Ursache der an den Bandspalten beobachteten Durchschläge ist, dass in der Luftströmung des (mit einer Geschwindigkeit von 180 km/ h bewegten) Fadenbandes Staub mitgeführt wird, der sich bevorzugt an den Bandspalten festsetzt, wo durch die Überlagerung von Haupt- und Transportfeld die Durchbruchfeldstärke am 30-stufigen Fadengenerator überschritten wird.
Hält man die Bandspalte jedoch staubfrei, so setzen diese Durchbrüche erst bei - 800 kV ein. Die maximale Generatorspannung kann durch Konditionierungsmassnahmen noch auf - 880 kV gesteigert werden, Abb. 15.

5.3 Der 42 - stufige 1 MV Fadengenerator

Da die Maximalspannung des 30 - stufigen Generators durch den Potentialteiler begrenzt war, lag es nahe, die Anzahl der Stufen zu erhöhen. Beim Ausbau der Säule auf 42 Stufen wurden alle Bandspalte sorgfältig poliert und mit Hilfe einer Justiervorrichtung jeweils so mit den Teilerplatten verklebt, dass das Fadenband in der Mittelebene der Bandspalte verläuft.
Über den mechanischen Aufbau und die Kurzschlusstromstärke dieses Generators wurde bereits in den Abschnitten 2 und 4.3 berichtet.
Durch die Verlängerung der Säule um weitere 12 Potentialteilerstufen konnte die Grenzspannung auf - 1,06 MV gesteigert werden, wobei sowohl Durchschläge an den Bandspalten die Zündung der Schutzfunken-

Abb. 15 : Die mit dem 30-stufigen Generator erzeugte unstabilisierte negative Hochspannung nach der Reinigung der Bandspalte und mit der neuen Beladungsvorrichtung (s. Abb. 7)

strecken einleiteten, als auch gelegentliche Koronaentladungen an der Hochspannungselektrode zu beobachten waren.

Bei der Registrierung der Generatorspannung über den Teilerstrom mit Schreiber oder Oszilloskop bewährten sich unterhalb 800 kV einfache Schutzmassnahmen, wie eine parallel zum Eingang geschaltete Edelgassicherung, Glimmlampe oder schnelle Schutzdioden. Bei höheren Spannungen führten jedoch die mit den Durchschlägen auftretenden Wanderwellen fast regelmässig zur Beschädigung dieser Registriergeräte. Aus diesem Grunde wurde der Teilerstrom im obersten Spannungsbereich stets direkt mit einem μA - Meter gemessen.

Die offene Bauweise des Generators erwies sich als besonders vorteilhaft für die Beobachtung von Störungen im Grenzspannungsbereich und bei der Durchführung von Abänderungen.

Die 42 Stufen des Potentialteilers sind in Reihe geschaltet. Solange die Durchbruchfeldstärke an der Hochspannungselektrode nicht überschritten wird, begrenzt die hochspannungstechnisch schlechteste Stufe die maximale Generatorspannung. Treten Durchschläge oder Koronaentladungen an einer bestimmten Stelle des Teilers vor Erreichen der Grenzspannung mit erhöhter Häufigkeit auf, so versucht man zunächst durch das Konditionieren bei langsamer Erhöhung des Beladestromes die Störung zu beseitigen. Gelingt dies nicht, dann findet man nach dem Abschalten des Generators in der Regel nicht brennbare Faserteilchen oder kleine Metallspäne als Ursache der Störung.

Die Grenzspannungen der verschiedenen Stufen können mit Hilfe einer Hochspannungskaskade geprüft und auf annähernd gleiche Werte (± 0, 2 kV) gebracht werden. Hierzu wird die Schutzfunkenstrecke auf die gewünschte Durchschlagsspannung eingestellt, der Teilerwiderstand entfernt und separat getestet, und der Verluststrom zwischen den isolierten Potentialteilerplatten gemessen. Wenn dieser bei einer angelegten Prüfspannung von - 30 kV den Wert von 3 nA überschreitet, empfiehlt es sich, die Stufe gründlich zu reinigen und ggfs. kritische Stellen nachzupolieren.

Sowohl für die Stabilität als auch für die maximal erreichbare Generatorspannung ist wichtig, dass die Ausgleichsvorrichtung für die konstante

Zugspannung einwandfrei arbeitet, und das Fadenband stets so stark gespannt bleibt, dass der Polyamiddraht in der Mittelebene der Bandspalte verläuft. Hierzu ist unter den üblichen Betriebsbedingungen ein Ausgleichsgewicht von 32 N erforderlich.
Da sich der Polyamiddraht während des Betriebes auf ca. 35° C erwärmt, muss die Antriebsrolle mit der hydraulischen Spannvorrichtung nach der Einlaufphase etwas nachgespannt werden. Die Ursachen für die Erwärmung des Polyamiddrahtes sind weniger die Be- und Entladungsvorgänge, sondern die Walkarbeit und Reibung, sowie der Kontakt mit der Antriebsrolle und der oberen Rolle, die durch die Lager erwärmt werden.
Bei einer Generatorspannung von 1 MV fliesst durch den Teiler ein Strom von 243 μA, sodass die Nutzleistung 243 Watt beträgt. Dagegen liegt die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors bei ca. 7000 Watt, was für unseren Fadengenerator den sehr geringen Wirkungsgrad η = 3,5 % ergibt. Der grösste Teil der aufgenommenen Leistung wird als Wärme in den Lagern freigesetzt. Nach der Erprobung von Nadellagern und mehreren parallel angeordneten Kugellagern, die sich weniger gut bewährten, verwenden wir ölbadgeschmierte Pendelrollenlager. Wegen der hohen Drehzahl von 6 000/min und der grossen Wellenbelastung von mehr als 10^4 N werden die Lagergehäuse jedoch auf Temperaturen bis zu 90° C erhitzt, was sich nachteilig auf die Lebensdauer der Lager auswirkt und zu Abdichtungsproblemen bei der Ölschmierung führt.

5.4 Die Stabilität der erzeugten Hochspannung

Wegen des Ladungstransportes auf der Isolatoroberfläche sind elektrostatische Generatoren nahezu ideale Stromquellen. Deshalb haben Schwankungen der Generatorspannung ihre Ursache entweder in der Inkonstanz des Ladestromes oder der angeschlossenen Verbraucher.
Nimmt man den Grenzspannungsbereich aus, in dem nach 5.1 koronabedingte Veränderungen des Widerstandswertes der Säule auftreten können,

und beachtet das ausgezeichnete Isoliervermögen der Plexiglasisolatoren, so kommen für die Spannungsschwankungen in erster Linie Vorgänge beim Ladungstransport in Frage, die durch Kurzschlusstrommessungen erfasst werden können [15].

Die Stabilität des Kurzschlusstromes und der Generatorspannung im stabilen Arbeitsbereich ist i. a. besser als 2 %. Höhere Schwankungen treten lediglich bei grösseren Netzspannungsänderungen auf, die vor der Fertigstellung der neuen Hochspannungshalle als Veränderung der Bandgeschwindigkeit und evtl. auch der Beladespannung am 30-stufigen Generator beobachtet wurden.

Mit einer einfachen Grobstabilisierungsvorrichtung lassen sie sich jedoch wieder auf Werte unter 2 % reduzieren. Hierzu wird der unterste Teilerwiderstand durch zwei parallel geschaltete 200 MΩ Widerstände ersetzt, deren Niederspannungsseiten isoliert durch die Erdelektrode geführt sind. Durch diese Stromverzweigung stehen zwei gleiche Signale zur Verfügung, von denen das eine zur Registrierung der Hochspannung und das andere als Führungsgrösse für die Regelung der Beladespannung dient. Die Abb. 16 zeigt die gewählte Schaltung.

Der normalerweise geerdete Fusspunkt der Glättsäule der symmetrischen Kaskade liegt hier auf einem positiven Korrekturpotential, das durch die an der Hochspannungstriode 6BK4 [66] abfallende Anodenspannung gegeben ist. Diese variable Korrekturspannung wird durch den Potentialteilerstrom über die negative Gittervorspannung gerade so gesteuert, dass die stabilisierende Veränderung der Beladespannung U_b eintritt. Da hierfür nur einige kV benötigt werden, erniedrigt man den am Gitterwiderstand R_g abfallenden Gleichspannungsanteil mit Hilfe einer Kompensationsstromquelle I_{komp}.

Die Arbeitsweise dieser einfachen Grobstabilisierungsvorrichtung geht aus der Abb. 17 hervor, in der sowohl die Generatorspannung U (über den Potentialteilerstrom), als auch die Beladespannung U_b (gemessen über den Widerstand R_b = 600 MΩ) mit dem Zweikanalschreiber am 30-stufigen Generator aufgezeichnet sind.

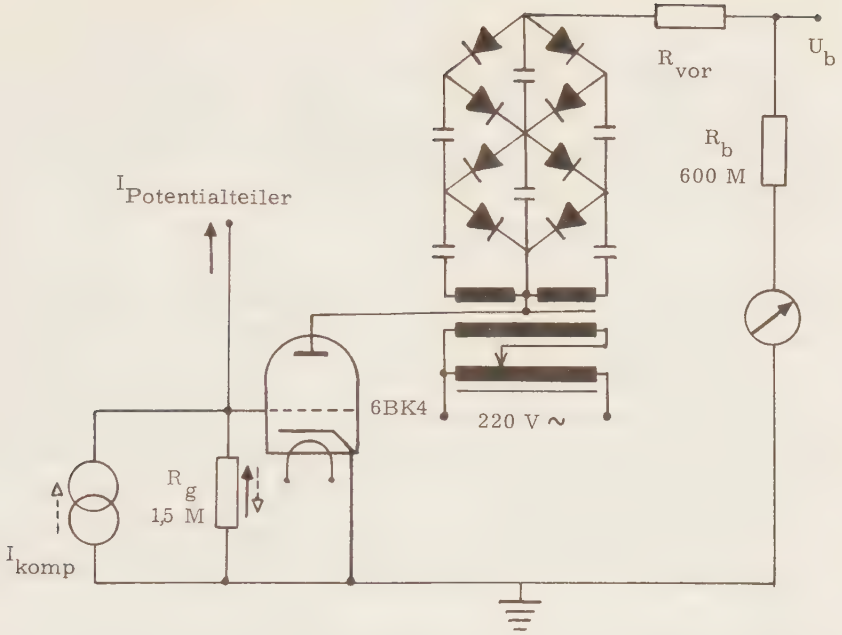

Abb. 16 : Schaltbild der Grobstabilisierung zur Regelung der Beladespannung

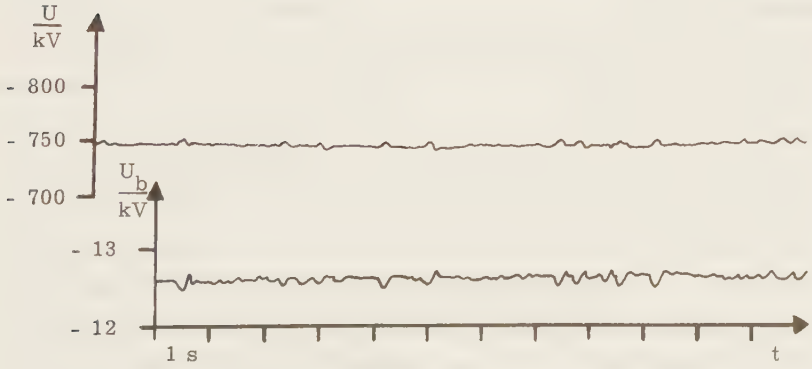

Abb. 17 : Zeitlicher Verlauf der grobstabilisierten Generatorspannung U und der regelnden Beladespannung U_b

Ein prinzipieller Nachteil dieser Methode liegt natürlich darin, daß die Stabilisierung mit einer Zeitverzögerung einsetzt, die sich aus der Bandgeschwindigkeit von 50 m/s und dem Abstand zwischen Belade- und Abnahmekamm von l = 1,5 m zu t = 30ms ergibt (beim 42-stufigen Generator ist l = 2 m und t = 40 ms).

Verwendet man zur Beladung des Fadenbandes eine Hochspannungskaskade, deren Ausgangsspannung z. B. eine Stabilität von 10^{-5} besitzt, so betragen die Schwankungen des Ladestromes (selbst wenn man die Bandgeschwindigkeit konstant hält) nach wie vor etwa 2 %. Die Ursache hierfür ist, daß der 1650 m lange Polyamiddraht sicher nicht als homogenes Dielektrikum aufgefaßt werden kann, sondern die auf der Isolatoroberfläche (wegen der Reibung an den Rollen) vorhandenen Restladungen oder Verunreinigungen zu Lastschwankungen in der Beladungsvorrichtung führen.

Deshalb sollten zur Bandbeladung nicht spannungsstabilisierte, sondern möglichst gut stromstabilisierte Kaskaden in Zukunft verwendet werden.

Durch die Wahl eines Vorwiderstandes von 10 MΩ oder 30 MΩ zwischen Kaskadenausgang und Beladekamm (s. 5.2 und Abb. 17) wird zwar eine gewisse stabilisierende Strombegrenzung erreicht. Eine wesentliche Verbesserung erhält man jedoch, wenn gemäß Abb. 18 der Vorwiderstand durch die Hochspannungstriode 6BK4 [66] ersetzt wird, die man als variablen, stromgesteuerten Hochspannungswiderstand betreibt. Eine Zunahme des Beladestromes führt zunächst zu einer größeren negativen Eingangsspannung des Operationsverstärkers, an dessen Ausgang das Gitter der Triode verstärkt negativ vorgespannt wird. Dadurch entsteht ein höherer Spannungsabfall zwischen Katode und Anode und führt, da die Kaskadenspannung konstant bleibt, über die Abnahme der Beladespannung zur stabilisierenden Verringerung des Beladestromes. Unter den normalen Betriebsbedingungen erreicht man damit stets eine Stabilität des Kurzschlußstromes von:

$$\frac{\Delta I_k}{I_k} \leq 5 \cdot 10^{-3}$$

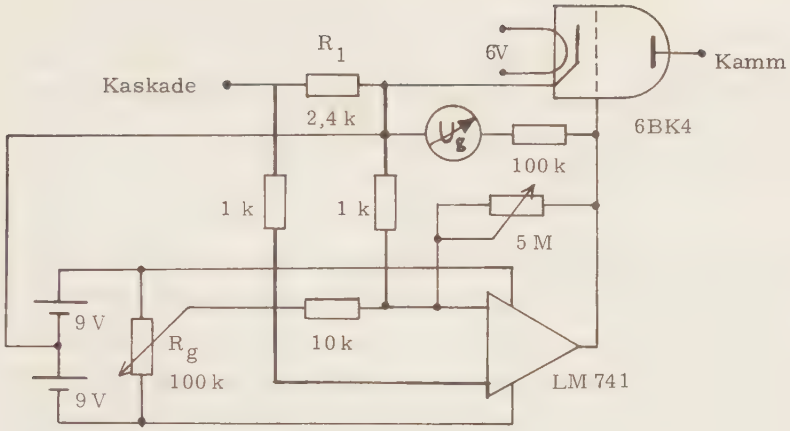

Abb. 18 : Stabilisierungsschaltung des Beladestromes

Beim Betrieb des Generators mit dieser Grobstabilisierungsvorrichtung muss zunächst die Gittervorspannung U_g am Potentiometer R_g auf - 8V und die Kaskadenspannung auf - 17 kV eingestellt werden. Verringert man dann die Gittervorspannung auf - 4,5 V, so fliesst ein Beladestrom von - 40 μA, der bei weiterer Abnahme von U_g auf - 1,5 V bei einem Strom von - 250 μA bereits zu einer negativen Generatorspannung von mehr als 1 MV führt.

Eine weitere Verbesserung der Stabilität wird erreicht, wenn man innerhalb der Hochspannungselektrode in die Ladungsabnahme [67] eingreift. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die in 4.3 beschriebenen Gleitentladungen durch die Zusatzelektrode und den Glättwiderstand hinreichend kompensiert sind.

Verwendet man eine zweite Stromstabilisierungsvorrichtung gemäss Abb. 18, die zwischen Glättwiderstand und Oszilloskopeingang geschaltet wird (bzw. beim Betrieb des Generators zwischen Glättwiderstand und Hochspannungselektrode), so sind die Schwankungen des Kurzschlussstromes deutlich geringer.

Da jetzt auch Geschwindigkeitsänderungen des Bandes und die an der oberen Rolle mit einer Frequenz von 100 Hz durch Reibung erzeugte Ladungen erfasst werden können, erreicht man mit beiden Vorrichtungen eine Stabilität von :

$$\frac{\Delta I_k}{I_k} \leq 2 \cdot 10^{-3}$$

Ausser den bisher aufgeführten Ursachen für die Stromschwankungen muss insbesondere bei hohen Flächenladungsdichten beachtet werden, dass in der Beladungsvorrichtung nach Abb. 7 nicht der gesamte Beladestrom auf der Polyamiddrahtoberfläche zur Hochspannungselektrode geführt wird, sondern ein zwar sehr geringer, mit steigender Beladespannung und Transportstromstärke jedoch zunehmender Anteil in der Beladesprühstrecke zur geerdeten Gegenelektrode fliesst.
Schliesslich können Fluktuationen der Ladungen auf dem Polyamid und Rückwirkungen auf die Bandgeschwindigkeit besonders dann nicht ausgeschlossen werden, wenn die Fadenschlingen zu Schwingungen angeregt werden.
Die Eigenfrequenzen ν_n einer auf der Länge l eingespannten und mit der Geschwindigkeit v bewegten Saite berechnen sich [68,69] zu

$$\nu_n = \frac{n}{2l} \cdot \frac{S/\varrho - v^2}{(S/\varrho)^{1/2}} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (11)$$

Setzen wir die bei unserem Generator bekannten Werte l = 2,26 m und v = 50 m/s , sowie für den 1,4 mm dicken Polyamiddraht $\varrho = 1{,}79 \cdot 10^{-3}$ kg/m und als Spannkraft S = 32 N ein, so erhalten wir

$$\nu_n = n \cdot 25{,}4 \text{ Hz} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

Der Einfluss der Fadenschwingungen lässt sich nicht schlüssig beurteilen, da die 2. Harmonische der Eigenschwingungsgrundfrequenz fast genau mit dem an der offenen Anlage stets messbaren 50 Hz Netzbrumm und ν_4 annähernd mit der Rollenfrequenz von 100 Hz übereinstimmt.
Sie unterscheidet sich jedoch wesentlich [15,37] von der Fadenbandumlaufsfrequenz, die 10 Hz beträgt.

6. Zusammenfassung

Der in dieser Arbeit vorgestellte offene elektrostatische Hochspannungsgenerator verwendet für den Ladungstransport nicht das in Van de Graaff-Generatoren übliche Band, sondern - nach einem Vorschlag von Bailitis - Polyamiddraht.

In umfangreichen Dauerversuchen wurde seine Eignung und Zuverlässigkeit erprobt und die bei der Verklebung und Führung des Monofils auftretenden Probleme gelöst.

Der 1,4 mm starke und insgesamt ca. 1,65 km lange Polyamiddraht wird durch die Aneinanderreihung von 328 parallelen und zusammenhängenden Fadenschlingen auf einer Breite von 49,2 cm endlos geführt, mit einer Geschwindigkeit von 50 m/s bewegt und ergibt damit eine Flächengeschwindigkeit von 24,6 m^2/s.

Beim einseitigen Ladungstransport (upcharge) beträgt der maximale Kurzschlusstrom - 720 μA und führt bei einer spezifischen Oberflächenladungsdichte $\sigma = 2{,}93 \cdot 10^{-9}$ As/cm^2 zu einer Transportfeldstärke von $E_t = 33{,}1$ kV/cm.

Diese Werte wurden durch die Entwicklung einer Beladungsvorrichtung erreicht, in der die normalerweise verwendete Beladerolle durch eine gewölbte Gegenelektrode ersetzt ist. Auch bei der Ladungsabnahme müssen die auftretenden Gleitentladungen kompensiert sein.

In der 30-stufigen Ausführung des Fadengenerators lassen sich Hochspannungen bis 750 kV stets sicher erzeugen. Hierbei haben sich die in Epoxidharz eingegossenen Potentialteilerwiderstände und die Isolatoren aus Plexiglas bewährt. Bei den Grenzspannungen von +780 kV und -880 kV treten Durchschläge im Potentialteiler auf.

Durch den Ausbau der Säule auf 42 Stufen konnte die Generatorspannung auf über 1 MV gesteigert werden.

Mit Hilfe von Grobstabilisierungsmassnahmen, die in den Belade- und Abnahmestrom eingreifen, lässt sich die Stabilität des Fadengenerators auf $2 \cdot 10^{-3}$ reduzieren.

Polyamiddraht hat sich als Ladungstransportmittel bewährt. Im Vergleich zum konventionellen Bandgenerator ist die Stromstärke um den Faktor zwei bis drei höher.

7. Danksagung

Herrn Prof. Dr. G. Möllenstedt danke ich herzlich für die Anregung und ständige Förderung dieser Arbeit.

Mein Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr. R. Schief für viele förderliche Gespräche, Herrn Dipl-Phys. H. Stumpp für seine Hilfsbereitschaft und die Berechnung der Potentialverteilung des Generatorhauptfeldes, und den Herren Pountzas, Falkenstein, Hauser und Zwanger für die Bearbeitung von Teilbereichen der Hochspannungstechnik im Rahmen von Zulassungs- und Diplomarbeiten.

Auch den Institutswerkstätten und dem technischen Personal sei für die gute Auftragsausführungen Dank gesagt. Für den Erfahrungsaustausch zu Beginn der Entwicklungsarbeiten danke ich Herrn Dipl. Ing. K. Willutzki.

Bis zur Fertigstellung der neuen Hochspannungshalle ermöglichte die Firma Polymer-Physik GmbH u. Co. KG., Tübingen-Derendingen, die Entwicklung des Fadengenerators in der 30-stufigen Grundausführung. Ihr habe ich für die Bereitstellung von Laborräumen, sowie für finanzielle Unterstützung und ihren Mitarbeitern für die erfolgreiche, gute Zusammenarbeit zu danken.

Die Firma Himmelwerk AG., Tübingen-Kilchberg, fertigte die Wellen für die Laufrollen und führte die notwendigen Auswuchtarbeiten durch. Herrn Dipl-Ing. Steinhilber sei hierfür an dieser Stelle gedankt.
Dem Zentrum für Datenverarbeitung der Universität Tübingen danke ich für die Bereitstellung von Rechenzeit.

8. Literatur- und Firmenverzeichnis

1 Bromley, D.A., Nucl. Instr. and Meth. 122 (1974) 1

2 Van de Graaff, R.J., Phys. Rev. 38 (1931) 1919A

3 U.S. Patent No. 1,991,236 (Feb. 12, 1935)

4 Van de Graaff, R.J., K.T. Compton, L.C. Van Atta, Phys. Rev. 43 (1933) 149

5 Tuve, M.A., L.R. Hafstad, O. Dahl, Phys. Rev. 48 (1935) 315

6 Van Atta, L.C., D.L. Northrup, C.M. Van Atta, R.J. Van de Graaff, Phys. Rev. 49 (1936) 761

7 Herb, R.G., D.B. Parkinson, D.W. Kerst, Phys. Rev. 51 (1937) 75

8 Herb, R.G., C.M. Turner, C.M. Hudson, R.E. Warren, Phys. Rev. 58 (1940) 579

9 Trump, J.G., Electr. Eng. (Sept. 1951) 1

10 Woods, R., J.L. Mc Kibben, R.L. Henkel, Nucl. Instr. and Meth. 122 (1974) 81

11 Knauer, W., Z. f. angew. Phys. 7 (1955) 118

12 Revue de Physique Appliquée No. 10 (1977) 1279 - 1625, 2nd Int. Conference on Electrostatic Accelerator Technology

13 Letournel, M., Revue de Physique Appliquée 10 (1977) 1375

14 Kossel, W., W. Knauer, Die Umschau 18 (1954) 564

15 Vermeer, A., B.A. Strasters, Nucl. Instr. and Meth. 131 (1975) 213

16 Swann, W.G., J. Franklin Inst. 205 (1928) 820

17 Vollrath, R.E., Phys. Rev. 42 (1932) 298

18 Pauthenier, M., M. Maureau-Hanot, J. Phys. et Rad. 8 (1937) 193

19 Neubert, U., Elektrostatik in der Technik, Verlag von R. Oldenbourg, München, 1954

20 Janner, K., S. Magun, E. Schopper, Z. f. angew. Phys. 7 (1955) 446

21 Bailitis, E., Z. f. angew. Phys. 13 (1961) 36

22 Pelletron charging chain : Geschützter Handelsname der NEC, National Electrostatics Corp., Middleton, Wisconsin, USA

23 Herb, R.G., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS18 (1971) 71

24 Herb, R.G., Nucl. Instr. and Meth. 122 (1974) 267

25 Laddertron chain : Geschützter Handelsname der HVEC, High Voltage Engineering Corp., Burlington, Mass., USA

26 Tait, N.R.S., G.R.P. Voss, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS20 (1973) 163

27 Burn, N., L.B. Bender, P.I. Hurley, Y. Imahori, Rev. de Phys. Appliquée 10 (1977) 1369

28 Aitken, T.W., J.M. Leese, Rev. de Phys. Appliquée 10 (1977) 1391

29 Schumann, W.O., Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen, Springer Verlag, Berlin, 1928

30 Roth, A., Hochspannungstechnik, Springer Verlag, Wien New York, 1965

31 Prabhakar, B.R., H.V. Gopalakrishna, Nucl. Instr. and Meth., 134 (1976) 217

32 Bostik Elecolit, Bostik GmbH, Oberursel/Taunus

33 Plexiglas, Röhm & Haas GmbH, Darmstadt

34 Araldit D + 7 % Härter HY 992, Ciba AG, Wehr, Baden

35 Quarzmehl W 12, Quarz - Werke GmbH, Köln

36 Stumpp, H., Diplomarbeit, Tübingen, 1975

37 Zwanger, G., Zulassungsarbeit, Tübingen, 1978

38 Bayer AG, Werk Dormagen, private Mitteilung

39 Willutzki, K., private Mitteilung

40 Flammersfeld, A., G. Weber, Z. Naturforsch. 7a (1952) 161

41 Kossel, W., Z. Phys. 111 (1938) 264

42 Neubert, U., Z. Phys. 110 (1938) 334

43 Kossel, W., F. Heise, Z. Phys. 113 (1939) 769

44 Fisk, J.B., I.A. Getting Phys. Rev. 53 (1938) 916 , Phys. Rev. 56 (1939) 1098

45 Heise, F., Z. Phys. 116 (1940) 317

46 Becker, E.W., Z. Naturforsch. 2 (1947) 395

47 Kessler, J., Ann. d. Phys. 6/15 (1955) 406

48 Baumhauer, W., P. Kunze, Z. Phys. 114 (1939) 197

49 Trump, I.G., R.J. Van de Graaff, Phys. Rev. 55 (1939) 1160

50 Collins, G.B., B. Waldmann, E. Guth, Phys. Rev. 56 (1939) 876

51 Wells, W.H., R.O. Haxby, W.E. Stephens, W.E. Shoup, Phys. Rev. 58 (1940) 162

52 Ardenne, M.v., Z. Phys. 121 (1943) 236

53 Walter, A.K., Elektrostatische Generatoren, Akademie - Verlag, Berlin, 1963

54 Bailitis, E., Z. angew. Phys. 17 (1964) 557

55 Paschen, F., Pogg. Ann. 37 (1889) 69

56 Bouwers, A., Elektrische Höchstspannungen, Springer Verlag, Berlin, 1939

57 Rogowski, W., Arch. El. 12 (1923) 1

58 Gentner, W., Erg. d. ex. Nat. wiss. 19 (1940) 110

59 Bailitis, E., Z. angew. Phys. 17 (1964) 301

60 Felici, N., Elektrostatische Hochspannungsgeneratoren, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1957

61 Pountzas, K., Diplomarbeit, Tübingen, 1975/76

62 Falkenstein, K., Zulassungsarbeit, Tübingen, 1975

63 Hauser, H. J., Diplomarbeit, Tübingen, 1977

64 Hiller, H., Diplomarbeit, Tübingen, 1969

65 Loeb, L. B., Electrical Coronas, University of California Press, Berkeley, Los Angeles, 1965

66 RCA, Receiving Tube Manual, Radio Corporation of America, Harrison, N. J.

67 Thieberger, P., R. Lindgren, M. Mc Keown, H. E. Wegner, Nucl. Instr. and Meth. 122 (1974) 527

68 Roth, W., Antriebstechnik 3 (1964) 48

69 Matthiew, R., VDI Berichte 48 (1961) 71

Lebenslauf

14.6.1941	geboren in Zgierz, Kr. Lodz, Polen Eltern: Emil Hiller, Dipl.-Kfm., † 1.1.1947 Irma Hiller, geb. Götz
1947 - 1952	Volksschule Welzheim, Kr. Waiblingen
1952 - 1958	Progymnasium Welzheim
1958 - 1961	Gymnasium Schorndorf, math. naturwiss. Zug, Reifeprüfung
1961 - 1962	Bundeswehr, Leutnant d.R.
WS 1962/63	Beginn Physikstudium, Universität Tübingen
12. 5. 1966	Diplomvorprüfung in Physik
1968 - 1969	Diplomarbeit: "Untersuchungen an elektrostatischen Hochspannungsgeneratoren nach Van de Graaff unter Verwendung von Poyamidfäden für den Ladungstransport" unter Anleitung von Prof. Dr. G. Möllenstedt
7. 7. 1970	Diplomhauptprüfung in Physik Wahlfach Kristallographie
1970 - 1973	Arbeit an der vorliegenden Dissertation bei der Firma Polymer - Physik GmbH & Co KG, Tübingen,
1973 - 1978	und als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für angewandte Physik der Universität Tübingen unter der Anleitung von Prof. Dr. G. Möllenstedt
Seit 1.8.78	Referent in der Zentralstelle für Technologieberatung und Technologievermittlung beim Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, Stuttgart Ich bin verheiratet und habe zwei Kinder

Meine akademischen Lehrer waren die Herren Professoren:
Auwärter, Bayh, Braunbek, Breitling, Bues, Dachs, Ehlich, Elwert, v. Engelhardt, Gaukler, Hewers, Möllenstedt, E. Müller, M. Müller, Kasper, Kleinpoppen, Kneser, Kramer, Krüger, Mack, Mühleisen, Reimer, Roquette, Rüdorff, Schief, Seiler, Sommer, Speidel, Schweizer, Wielandt, Wildermuth, Vogel, Wittern, Wolf, Zeller.